

# SWAT의 지표하 유출 계산 모듈의 개선

## Improvement of Subsurface Flow Module in SWAT

김남원\*, 이정우\*\*  
Nam Won Kim, Jeongwoo Lee

### 요 지

SWAT 모형에서는 중간유출, 침투, 토양 증발, 식물에 의한 증산 등의 수문과정을 모사하기 위해서 토양 수대를 토양의 물리적 특성에 따라 몇 개의 층으로 구분하고, 각 층별로 순차적으로 각 성분량을 계산한다. 이 때 지표유출로 인한 영양물질 이송이 기작되는 영역을 설정하기 위해서 사용자가 입력한 첫 번째 토양층을 강제로 둘로 구분하여 상부 10mm의 새로운 토양층이 자동 생성되도록 알고리즘화되어 있다. 그러나, 동일한 토양 특성을 가진 층을 임의적으로 둘로 구분하는 것은 토양 물리적 관점에서 보면 적절하지 않으며, 또한 생성된 매우 얇은 상부 10 mm 토양층으로 인해서 포장용수량을 초과하는 과잉수가 커져 경사가 급한 유역이나 토양층의 투수성이 매우 큰 지역에 모형을 적용할 경우에는 중간유출량이 비현실적으로 크게 계산되는 문제를 수반한다. 따라서 본 연구에서는 중간유출이 크게 계산되는 문제점을 해결하고 토양층내의 수분 거동을 보다 현실적으로 모사하기 위해서 합체-분리 (combining-partitioning) 방식의 토양층 구조화 기법을 고안하고 SWAT의 지표하 유출 계산 모듈에 새롭게 추가하였다. 모형 개선이 수문 및 수질 성분 모의에 미치는 영향을 평가하기 위해서 충주댐 상류유역을 대상으로 모델링을 수행하고 상대비교를 한 결과, 토양수분, 중간 및 지하수유출, 인 순환에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

**핵심용어 : SWAT, 지표하 유출, 중간유출, 토양층**

### 1. 서 론

SWAT 모형을 우리나라 산지유역과 같이 경사가 급한 유역에 적용할 경우에 중간유출 성분이 매우 과다하게 산정되는 경우가 종종 발생한다. 이러한 이유 중 하나는 SWAT에서 설정하고 있는 유역경사길이와 관련된 지형인자 디폴트 값에서 찾을 수 있다. 모형에서는 유역경사가 25%를 초과하였을 경우에 자동적으로 유역경사길이(SLSUBBSN)를 0.05m로 매우 작게 설정하고 있다. 모형에서는 중간유출량 계산을 위해서 사용자가 토양경사길이(SLSOIL)를 별도로 입력하지 않으면, SLSOIL값에 SLSUBBSN값이 디폴트 값으로 입력되기 때문에 유역경사값에 따라 비현실적으로 중간유출량이 크게 계산될 수 있다. 이를 해결하기 위해서 임경재(2007) 등은 식 (1)과 같이 경사와 경사장 간의 회귀식을 유도하여 모형에 탑재함으로써 지형인자로 인하여 중간유출량이 과다하게 산정되는 문제점을 어느 정도 개선하였다.

$$SLSUBBSN = 120.51 \times \exp(-0.0978 \times SLOPE \times 100) \quad (1)$$

식 (1)을 이용할 경우 중간유출량 크기가 상당량 줄었으나, 여전히 중간유출량이 크게 계산되는 경우가 빈번하게 발생한다. 따라서 본 연구에서는 중간유출이 크게 계산되는 주된 이유를 토양

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구부 수자원연구실 책임연구원 · E-mail : [nwkim@kict.re.kr](mailto:nwkim@kict.re.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구부 수자원연구실 선임연구원 · E-mail : [ljw2961@kict.re.kr](mailto:ljw2961@kict.re.kr)

층 구분 방식에서 찾고자 하였고, 근본적인 문제를 해결하기 위해서 집합-분리방식의 새로운 토양층 구조화 기법을 고안하여 SWAT의 지표하유출 계산모듈을 수정하였다. 충주댐 상류유역을 대상으로 모형 개선 전후에 따른 수문 및 수질 성분 모의의 변화를 비교 평가하였다.

## 2. SWAT의 지표하유출 계산모듈의 개선

SWAT 모형에서는 중간유출, 침투, 토양 증발, 식물에 의한 증산 등의 수문과정 및 질소나 인 등의 영양물질 순환과정을 모사하기 위해서 토양수대를 토양의 물리적 특성에 따라 몇 개의 층으로 나누어 각 층별로 순차적으로 수문, 수질성분을 계산하고 있다. 특히 지표유출로 인한 영양물질의 이송을 모사하기 위하여 사용자가 입력한 첫 번째 토양층을 둘로 구분하여 상부 10mm의 새로운 토양층을 자동 생성되도록 알고리즘화되어 있고, 생성된 새로운 층은 분할전 토양 성질과 동일하다고 간주되며 위조점, 포장용수량 등의 토양 특성값의 절대량은 층 두께에 비례해서 부여하고 있다 (그림 1).

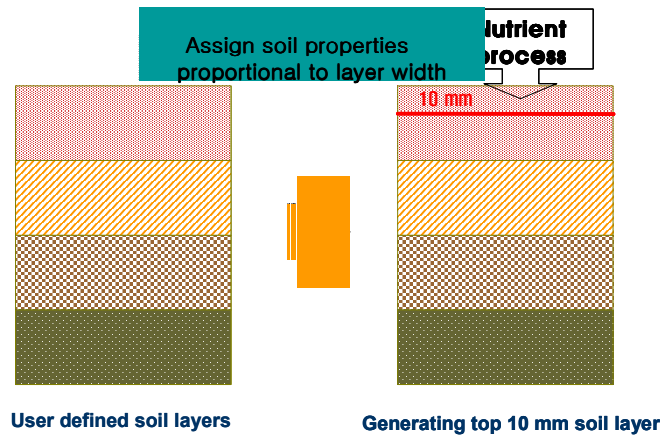


그림 1. SWAT의 상부 10mm 토양층 자동생성

그런데 중간유출량은 식 (2)와 같이 포장용수량 이상의 과잉수에 비례하여 결정되기 때문에 새로 설정된 10mm 토층은 매우 얇아 포장용수량이 매우 작으며 따라서 과잉수가 무조건 커서 중간유출이 크게 계산될 수밖에 없다.

$$Q_{at} = 0.024 \left( \frac{2SW_{ly,excess}K_{sat}slp}{\psi_d L_{hill}} \right) \quad (2)$$

여기서,  $Q_{at}$ 는 중간유출량,  $SW_{ly,excess}$ 는 해당 층의 포장용수량 이상의 과잉수,  $K_{sat}$ 는 토양층의 포화투수계수,  $\psi_d$ 는 공극률, 그리고  $slp$ 와  $L_{hill}$ 는 경사와 경사장이다. 또한, 토양 물리적 관점에서 보더라도 같은 토양 특성을 가진 층을 임의적으로 구분하는 것은 적절하지 않다. 미세질 토양층과 조립질 토양층 사이에서 토양수의 과다유입으로 모세관 붕괴(capillary breaking) 현상이 발생하는 경우, 불투수층이 하단부에 있는 경우와 같이 일반적으로 이질적인 성질의 토양층이 연결해 있을 때 중간유출이 크게 발생한다. 그러나, SWAT의 새로 구성된 1, 2층은 동질의 토양물성치를 갖는 층으로써 1층에서 중간유출이 지배적으로 발생한다고 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 지표하유출성분의 현상학적으로 현실성을 높이기 위해서 집합-분리(combining-partitioning) 방식의 토양층 구조화 모듈을 새롭게 고안하였다. 이 모듈에서는 그림 2와 같이 중간유출 및 침투량을 계산할 때에는 1, 2 토양층을 합쳐 하나의 토양층으로 간주하며,

영양물질 순환 및 이송 모의 단계에서는 다시 두 개의 토양층으로 분리하여 계산하도록 알고리즘화되어있다. 토양층 분리시에는 해당 층내 함수비가 균질하다는 가정하에 토양층 두께에 비례하여 토양수분량, 중간유출량이 재분배되도록 처리하였고, 침투량은 1층이 매우 얇기 때문에 1층에서는 침투의 지체를 무시하고 합쳐진 토양층에서 계산된 침투량을 1, 2층에 동일하게 부여하였다.

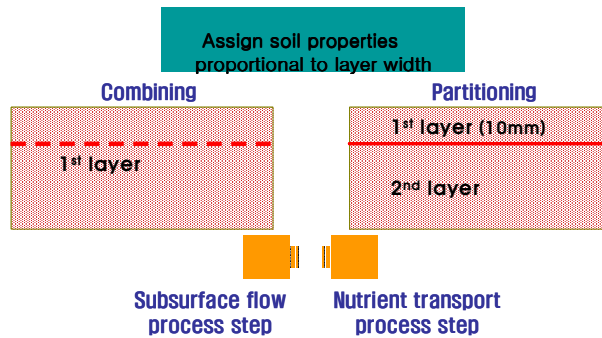
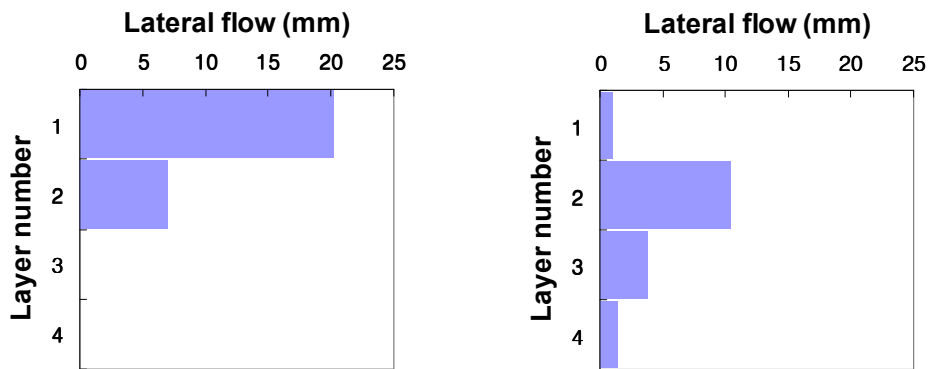


그림 2. 합체-분리방식의 토양층 구조화기법

### 3. 지표하유출모듈의 개선효과

충주댐 상류유역에 대해서 지표하유출 모듈개선으로 인한 수문성분 및 수질성분량의 변화를 검토하였다. 모형의 입력자료로서 강수량 자료는 영월 외 31개 우량관측소, 기타 기상자료는 충주 외 7개 기상관측소 자료를 이용하였다. 수치표고모델(DEM)은 국가수자원관리종합정보에서 제공하는 30m×30m 해상도의 DEM을 SWAT 모형의 계산 효율을 고려하여 ArcInfo에 의해 100m×100m로 가공하여 사용하였으며, 토지피복도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도, 토양도는 농업과학기술원에서 제공하는 1:25,000 해상도의 정밀토양도를 사용하였다. 자세한 대상유역 현황 및 입력자료에 관한 내용은 과학기술부(2007) 보고서와 김남원 등(2007)의 논문에 수록되어 있다.

충주댐 유역을 토지피복과 토양도를 조합하여 155개의 HRU로 구분하였고, 이 중 산지와 “오대” 토양통으로 구성된 HRU 84번에 대해서 모의 4,561일째의 중간유출량, 침투량, 토양수분량을 그림 4 ~ 그림 6에 나타내었다. 개선 전에는 제 1층에서 집중되어 중간유출이 크게 발생하고 있으며 특히 제 3층 이하로는 침투량이 일어나고 있지 않아 지하수 함양 성분이 0이 되고 있다. 반면에 개선 후에는 중간유출 및 침투량이 하층에서도 발생하고 있다. 개선 전 토양수분량은 1층의 큰 중간유출로 인해서 개선 후에 비해서 상대적으로 작게 산정되고 있다.



(a) 개선 전

(b) 개선 후

그림 3. 개선에 따른 중간유출량 변화

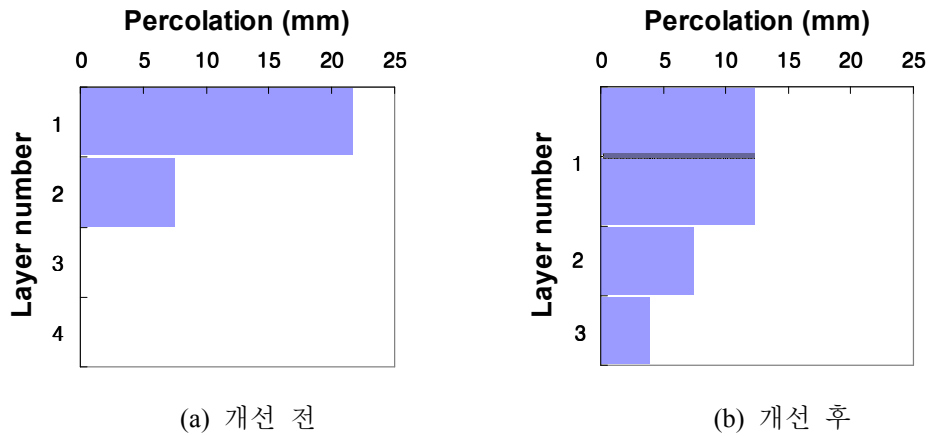


그림 4. 개선에 따른 침투량 변화

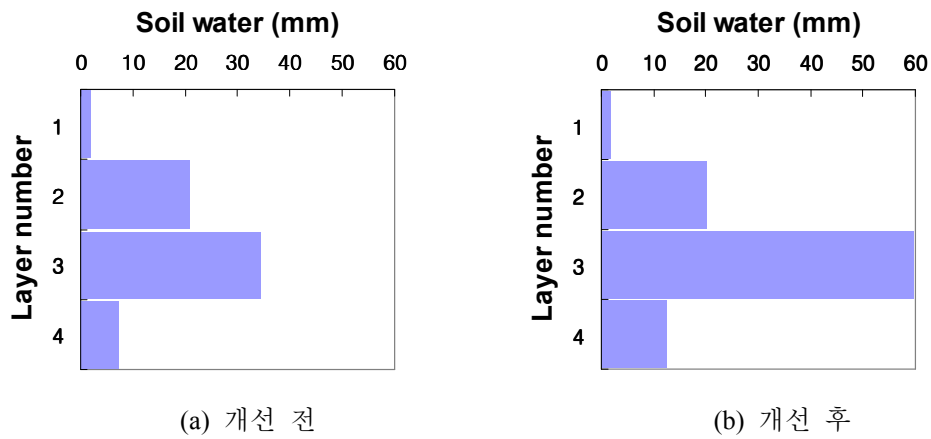


그림 5 개선에 따른 토양수분량 변화

지표하유출 모듈개선에 따른 유역의 수문수질성분의 변화를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 횡축은 순서대로 지표유출성분(SurfQ), 중간유출성분(LatQ), 지하수유출성분(GwQ), 증발산량(EVT), 총유출성분(TotalQ)의 유역평균 발생량과 유역 출구점에서의 유사량(SS), 총질소(TN), 총인(TP)이며, 종축은 이들의 개선 전에 대한 개선 후의 상대적인 비를 나타낸 것으로 1보다 크면 개선 후에 증가한 것을 의미한다. 지표유출성분은 수정 SCS-CN 법에 따라 토양수분량의 함수로 일별로 계산되는데, 개선 후 토양수분량의 증가로 유출곡선지수 및 지표유출량이 약간 증가하였다. 제 1층에서 집중되어 크게 발생하던 중간유출성분은 모형 개선 후 층별로 적절하게 배분됨에 따라 개선전의 약 80% 수준으로 감소하였다. 역시 연직하향으로의 침투량이 증가하여 지하수 유출성분은 50% 이상 커졌다. 일반적으로 식물에 공급될 수 있는 토양수분량이 많을수록 증산량이 증가하지만, 본 예제의 경우에는 토양층별 수분량의 변화가 토양온도, 질소나 인의 토양저장량 및 식물에 의해 흡수되는 량의 변화 등 작물의 생장, 억제 인자에도 영향을 미쳐 엽면적지수(LAI)가 감소하여 결국 증발산량이 다소 줄어들었다. 유사량은 MUSLE 공식에 따라 계산되는데 지표면 유출이 증가하여 유사량도 약간 증가하였다. 질소나 인의 순환은 토양내 수분량, 온도, 영양물질량, 작물의 생체량 등의 조건에 따라 변하는데, 본 경우에는 총질소와 총인의 감소의 지배적인 이유는 각각 중간유출 감소에 따른 질산염 이송량의 감소와 토양수분 증가에 따른 무기인 증가에 의한

것으로 판단된다. 이 처럼 유출 계산 구조의 개선이 유출 뿐 아니라 영양물질 순환계에도 영향을 미치므로 개선의 의미가 크다고 하겠다.

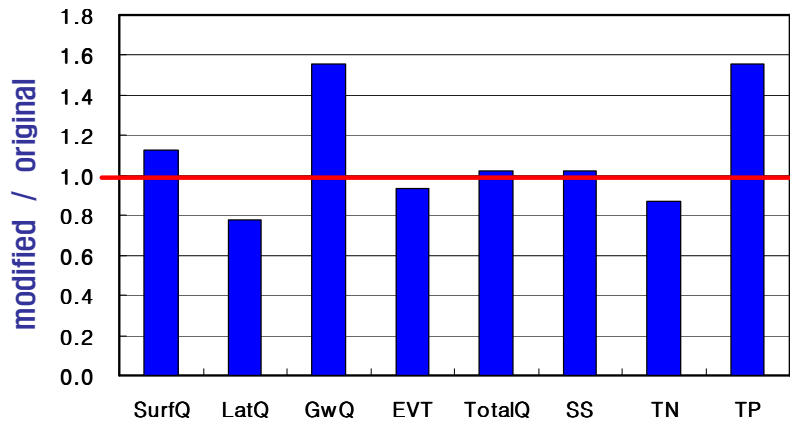


그림 6. 지표하유출 모듈 개선에 따른 수문, 수질 성분량의 변화

#### 4. 결론

우리나라 산지유역과 같이 경사가 급한 유역에 SWAT 모형을 적용할 경우에 중간유출 성분이 비현실적으로 과다하게 산정되는 문제를 해결하고 토양층내의 수분 거동을 보다 현실적으로 묘사하기 위해서 집합-분리 방식의 토양층 구조화 기법을 새롭게 개발하였다. 이 기법에서는 중간유출 및 침투량을 계산하는 지표하유출성분 계산 단계에서는 1, 2 토양층을 합쳐 하나의 토양층으로 간주하여 계산하고, 영양물질 순환 및 이송 모의 단계에서는 다시 두 개의 토양층으로 분리하여 계산하도록 알고리즘화되었다. 집합-분리 방식의 토양층 구조화 기법을 SWAT의 지표하유출 계산 모듈에 탑재하고 개선에 따른 수문 및 수질 성분 모의에 미치는 영향을 충주댐 상류유역을 대상으로 평가하였다. 모의 결과, 중간유출량과 침투량이 토양층내에서 보다 현실적으로 분배되었으며, 연 평균 모의값 비교에 따르면 중간 및 지하수유출, 인 순환에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. 과학기술부 (2007). 지표수 수문성분 해석기술 개발, 한국건설기술연구원.
2. 김남원, 이병주, 이정은 (2007). “공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구.” 대한토목학회 논문집, 27(4B), pp. 431-440.
3. 임경재 (2007). SWAT slope computation module, <http://www.envsys.co.kr/~swat/>